PARTE

1

Movimiento, fuerza y energía

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 Espacio, tiempo y masa
CAPÍTULO 2 Movimiento rectilíneo
CAPÍTULO 3 Vectores
CAPÍTULO 4 Movimiento en dos y tres dimensiones
CAPÍTULO 5 Leyes del movimiento de Newton
CAPÍTULO 6 Más aplicaciones de las leyes de Newton
CAPÍTULO 7 Trabajo y energía
CAPÍTULO 8 Conservación de la energía
CAPÍTULO 9 Gravitación
CAPÍTULO 10 Sistemas de partículas
CAPÍTULO 11 Choques
CAPÍTULO 12 Rotación de un cuerpo rígido
CAPÍTULO 13 Dinámica de un cuerpo rígido
CAPÍTULO 14 Estática y elasticidad

En el lanzamiento, el conjunto del transbordador espacial, incluidos el tanque exterior de combustible y los cohetes aceleradores auxiliares, tiene una masa de 2×10^6 kg. El empuje de los potentes motores de cohete, entre ellos los motores principales del orbitador del transbordador que aquí se muestra, acelera todo el vehículo de lanzamiento a la velocidad del sonido en sólo 45 segundos.

CAPÍTULO

1 Espacio, tiempo y masa

1.1 Coordenadas y marcos de referencia

1.2 La unidad de longitud

1.3 La unidad de tiempo

1.4 La unidad de masa

1.5 Unidades derivadas

1.6 Cifras significativas; coherencia de unidades y conversión de unidades

CONCEPTOS EN CONTEXTO

Conceptos en contexto

Los geólogos y los topógrafos utilizan un dispositivo láser para medir distancias. Este mecanismo emite un haz de luz hacia un espejo colocado a una distancia desconocida y mide el tiempo que tarda el haz en viajar al espejo y regresar. Una vez medido este tiempo de viaje redondo y la velocidad conocida de la luz, se calcula la distancia. Como la rapidez de la luz es muy alta, el tiempo del recorrido total es muy pequeño.

Con la definición de las unidades de distancia y tiempo que se dan en este capítulo, pueden considerarse las siguientes preguntas:

? ¿Qué tan lejos viaja la luz en una pequeña fracción de segundo? (Ejemplo 1, página 10)

? ¿Cómo se imita la precisión en la determinación de la distancia por la precisión en la medición del tiempo? (Ejemplo 3, página 15)

01-OHANIAN.indd 2 21/10/08 15:37:19

El investigador de cualquier fenómeno: terremoto, relámpago, choque entre dos barcos, debe comenzar preguntando ¿dónde y cuándo sucedió? Los fenómenos ocurren en puntos del espacio y en instantes de tiempo. Un fenómeno complicado, como el choque entre dos buques, se extiende a muchos puntos del espacio y del tiempo. Pero sin importar lo complicado que sea, cualquier fenómeno puede describirse totalmente expresando lo que ocurrió en diversos puntos del espacio y en sucesivos instantes del tiempo. Las mediciones de las posiciones y los tiempos necesitan la utilización de cuadrículas de coordenadas y marcos de referencia, que se discutirán en la primera sección de este capítulo.

Los barcos y otros cuerpos macroscópicos están hechos de átomos. Debido a que los tamaños de los átomos son extremadamente pequeños en comparación con las dimensiones de los cuerpos macroscópicos, puede considerarse a los átomos como masas casi puntuales, para la mayoría de los fines prácticos. *Una masa puntual sin tamaño ni estructura interna discernibles se llama* **partícula ideal**. En cualquier instante del tiempo, la partícula ideal ocupa un solo punto del espacio. Además, la partícula tiene masa. Y eso es todo: si se conoce la posición que ocupa una partícula ideal en cada instante del tiempo y se sabe su masa, entonces se conoce todo lo que puede saberse de la partícula. *La posición, el tiempo y la masa dan una descripción completa del comportamiento y de los atributos de una partícula ideal.** Como cada cuerpo macroscópico consiste de partículas, es posible describir su comportamiento y sus atributos describiendo las partículas que lo conforman. Así, las mediciones de posición, tiempo y masa son de importancia fundamental en la física. En secciones posteriores de este capítulo se tratarán las unidades que se emplean para estas mediciones.

1.1 COORDENADAS Y MARCOS DE REFERENCIA

Si está perdido en algún lugar de las carreteras de Canadá y se detiene en una gasolinera a preguntar cómo llegar a Moose Jaw, el dependiente puede darle instrucciones de ir 90 kilómetros hacia el norte sobre la Ruta 6 y luego 70 kilómetros al oeste por la Ruta 1 (véase la figura 1.1). Al darle estas instrucciones, el dependiente está tomando la gasolinera como **origen** y está especificando la posición de Moose Jaw en relación con este origen. Para obtener una descripción cuantitativa precisa de la posición de una partícula, los físicos usan casi el mismo procedimiento. Primero toman algún punto conveniente del espacio como origen y luego especifican la posición de la partícula en relación con este origen. Para este propósito, imaginan una cuadrícula de líneas alrededor del origen y dan la ubicación que guarda la partícula dentro de esta cuadrícula; es decir, imaginan que el suelo está cubierto con papel cuadriculado y luego especifican la posición de la partícula por medio de coordenadas que se leen en este papel.

Las coordenadas más comunes son las **coordenadas rectangulares** x y y, que se basan en una cuadrícula rectangular. La figura 1.2 muestra una cuadrícula de este tipo. Las líneas mutuamente perpendiculares que pasan por el origen O se llaman eje x y eje y. Las coordenadas del punto de la cuadrícula P, donde está colocada la partícula, simplemente indican qué tan lejos debe moverse en forma paralela al eje correspondiente a fin de llegar desde el origen O hasta el punto P. Por ejemplo, el punto P que se muestra en la figura 1.2*a* tiene las coordenadas $x = 3$ unidades y $y = 5$ unidades. Si se mueve desde el origen en dirección opuesta a la indicada por la flecha del eje, entonces la coordenada es negativa; así, el punto P que se muestra en la figura 1.2*b* tiene una coordenada negativa, $x = -3$ unidades.

FIGURA 1.1 Para llegar a Moose Jaw, Canadá, el automóvil tiene que viajar 90 km al norte y luego 70 km al oeste.

* No se considerará por ahora la posibilidad de que la partícula tenga también una carga eléctrica. La electricidad es el tema de los capítulos 23-33.

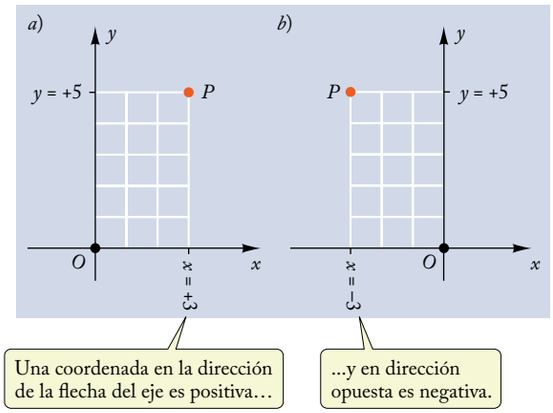


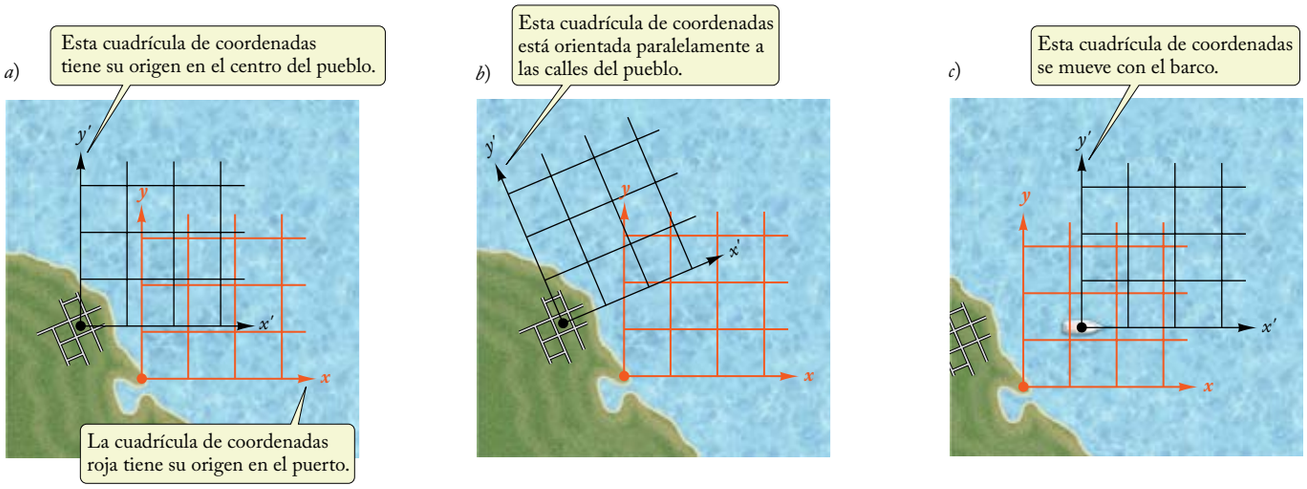
FIGURA 1.2 Las coordenadas rectangulares x y y de un punto P. *a*) Ambas coordenadas son positivas; *b*) la coordenada x es negativa.

La cuadrícula bidimensional que se muestra en la figura 1.2 es adecuada cuando se quiere describir el movimiento bidimensional (este-oeste y norte-sur) de un automóvil que viaja en un terreno plano o el movimiento de un barco en la superficie casi plana del agua de un puerto. Sin embargo, si se desea describir el movimiento tridimensional (este-oeste, norte-sur y arriba-abajo) de un vehículo aéreo que está volando o de un submarino que se sumerge en el océano, entonces se necesita un sistema tridimensional de coordenadas, con ejes x, y y z. Y si se desea describir el movimiento de un automóvil por un camino recto, entonces es necesario un sistema unidimensional; es decir, se requiere sólo el eje x, que se imagina colocado a lo largo del camino.

Cuando se determina la posición de una partícula mediante una cuadrícula de coordenadas construida alrededor de algún origen, se realiza una medición *relativa*: las coordenadas del punto en el que está ubicada la partícula dependen de la selección del origen y de la selección de la escala de la cuadrícula de coordenadas. La selección del origen de las coordenadas y de la cuadrícula de coordenadas es cuestión de conveniencia. Por ejemplo, un capitán de puerto puede usar una cuadrícula de coordenadas cuyo origen sea el puerto; pero un ingeniero municipal podría usar una cuadrícula de coordenadas con su origen en el centro del pueblo (véase la figura 1.3*a*) o bien, girada con orientación paralela a las calles del pueblo (véase la figura 1.3*b*). El timonel de un barco puede encontrar conveniente colocar el origen en el punto medio de su barco y usar una cuadrícula de coordenadas construida alrededor de este origen. La cuadrícula se mueve entonces con el barco (véase la figura 1.3*c*). Si el timonel grafica la ruta de un segundo barco en esta cuadrícula, con sólo mirar ambas cuadrículas puede decir cuál será la distancia de mayor proximidad entre ambas embarcaciones y si el otro barco se encuentra en una ruta de colisión, es decir, si cruzará el origen.

Para la descripción del movimiento de una partícula, debe especificarse tanto su posición como el tiempo en el que ésta se mantiene. Para determinar el tiempo, se usa un sistema de relojes sincronizados colocados mentalmente a intervalos regulares a lo largo de la cuadrícula de coordenadas. Cuando una partícula pasa por un punto P de la cuadrícula, las coordenadas proporcionan la posición que ocupa la partícula en el espacio y el tiempo registrado por el reloj más cercano determina el tiempo t. *Tal cuadrícula de coordenadas y relojes sincronizados se llama* **marco de referencia**. Al igual que la selección del origen y de la cuadrícula de coordenadas, la selección del marco de referencia es cuestión de conveniencia. Por ejemplo, la figura 1.4*a* muestra un marco de referencia establecido alrededor del puerto y la figura 1.4*b* muestra uno construido alrededor del barco. Los marcos de referencia normalmente se nombran según el cuerpo o punto

FIGURA 1.3 Cuadrículas de coordenadas rectangulares x-y (roja) y x'-y' (negra). *a*) Esta cuadrícula rectangular x'-y' está desplazada en relación con x-y. *b*) Esta cuadrícula rectangular x'-y' se encuentra girada en relación con x-y. *c*) Esta cuadrícula rectangular x'-y' está en movimiento en relación con x-y.



alrededor del cual se construyen. Así, se habla del marco de referencia del puerto, el marco de referencia del barco, el marco de referencia del laboratorio, el marco de referencia de la Tierra, etcétera.

Revisión 1.1

PREGUNTA 1: Para una partícula ideal, la posición y la masa son las dos únicas cantidades medibles (en cualquier instante dado). Considere un cuerpo extenso, por ejemplo, una bola de boliche. ¿Qué cantidades puede usted medir respecto a la bola de boliche, además de la posición y la masa? ¿Sabe usted las unidades de cualquiera de estas cantidades?

PREGUNTA 2: Considere una cuadrícula de coordenadas x'-y' desviada en una cantidad fija en relación con la cuadrícula x-y, como se muestra en la figura 1.3*a*. Marque un punto P en esta cuadrícula. El valor de x' para un punto P dado ¿es mayor o menor que el valor de x? ¿Qué puede decir acerca de los valores de y' y y?

PREGUNTA 3: ¿Cuál es la diferencia entre una cuadrícula de coordenadas y un marco de referencia?

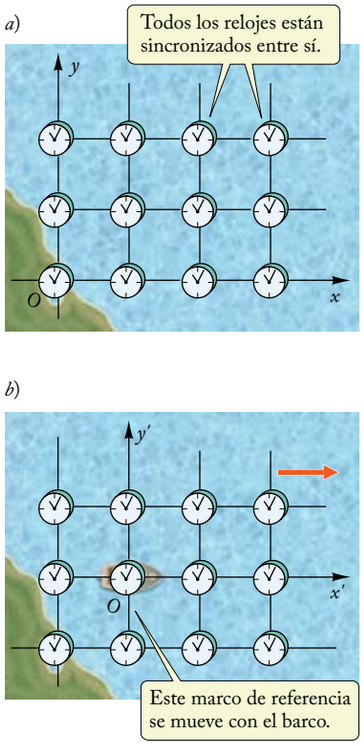


FIGURA 1.4 *a*) Un marco de referencia consiste en una cuadrícula de coordenadas y un sistema de relojes sincronizados. *b*) Un marco de referencia construido alrededor de un barco.

1.2 LA UNIDAD DE LONGITUD

Para realizar registros numéricos de las mediciones de posición, tiempo y masa, es necesario adoptar una unidad de longitud, una unidad de tiempo y una unidad de masa, de tal manera que puedan expresarse las mediciones como múltiplos numéricos o fracciones de estas unidades. En este libro se usarán las **unidades del sistema métrico**, *que está basado en el metro como unidad de longitud, el segundo como unidad de tiempo y el kilogramo como unidad de masa.* Estas unidades de longitud, tiempo y masa, junto con las unidades de temperatura y carga eléctrica (que se introducirán en capítulos posteriores), son suficientes para la medición de cualquier cantidad física. Los científicos y los ingenieros se refieren a este conjunto de unidades como el **Sistema Internacional de Unidades**, o **unidades SI** (del francés, *Système International*).*

Originalmente, la norma de longitud que especificaba el tamaño de un metro era el metro patrón que se conserva en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres, Francia. Este metro patrón es una barra de una aleación de platino-iridio con una fina

FIGURA 1.5 Barra del metro patrón internacional.

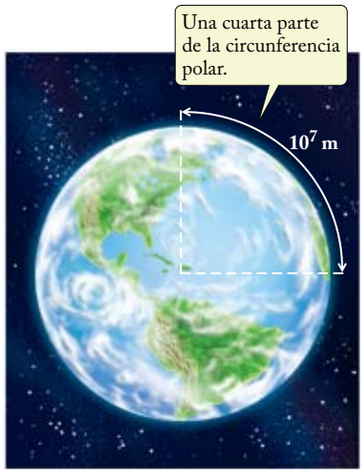


FIGURA 1.6 Una cuarta parte de la circunferencia polar de la Tierra es aproximadamente igual a 10^7 m.

* Las unidades SI también se explican en el apéndice 5; puede hallarse más información en el sitio de red del National Institute of Standards and Technology: http://www.physics.nist.gov/cuu/Units.

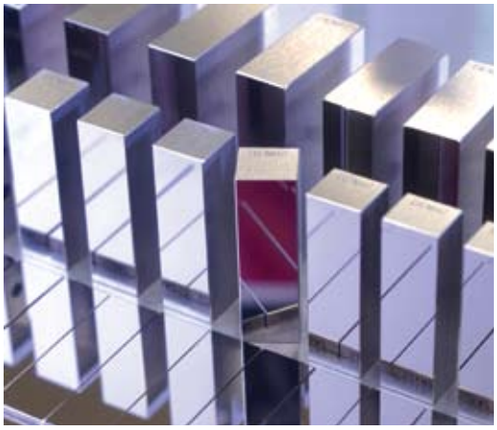


FIGURA 1.7 Algunos bloques de calibración, comúnmente usados por los ajustadores como patrones de longitud. La altura o el espesor de cada bloque sirve como norma de longitud.

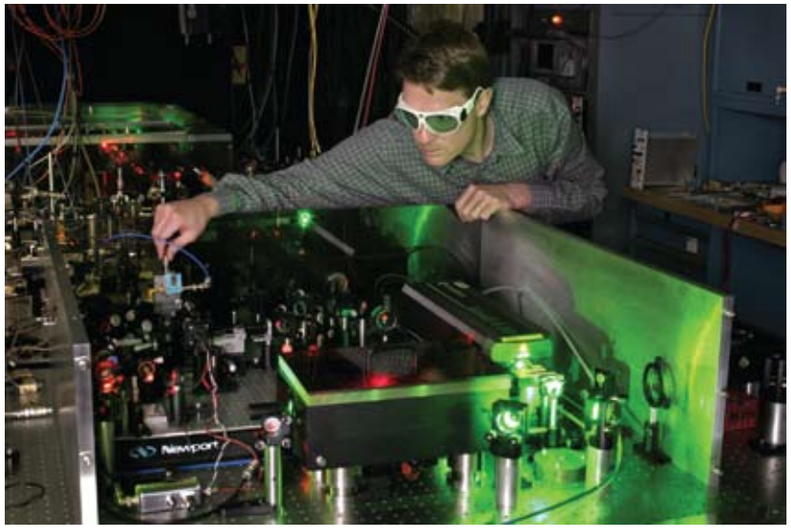


FIGURA 1.8 Láser estabilizado en el National Institute of Standards and Technology.

raya marcada cerca de cada extremo (véase la figura 1.5). Por definición, la distancia entre estas rayas se consideró justamente un metro. La longitud del metro se escogió de manera original para que la circunferencia polar de la Tierra midiera exactamente 40 millones de metros (véase la figura 1.6); sin embargo, las determinaciones modernas de esta circunferencia muestran que mide aproximadamente 0.02% más que 40 millones de metros.

En Francia se fabricaron copias del metro patrón prototipo y se distribuyeron a otros países para usarlos como patrones secundarios. Los patrones de longitud que se usan en la industria y en la ingeniería se han derivado de estos metros patrones secundarios. Por ejemplo, la figura 1.7 muestra un conjunto de bloques de calibración que se usan comúnmente como patrones de longitud en los talleres mecánicos.

La precisión del metro patrón está limitada por la aspereza de las rayas de marca en sus extremos. Para obtener mayor exactitud, los físicos desarrollaron definiciones mejoradas del estándar de longitud. La mejora más reciente surgió de la invención de los láseres estabilizados (véase la figura 1.8). Éstos emiten ondas de luz extremadamente uniformes, que hacen posible determinar la rapidez de la luz con una gran precisión. Lo anterior condujo a la adopción de una nueva definición de la longitud del metro en relación con la rapidez de la luz: el **metro** (1 m) es la longitud que recorre una onda de luz en el vacío en un intervalo de 1/299 792 458 segundos. Observe que, como el metro está ajustado de modo que la luz viaje exactamente un metro en 1/299 792 458 segundos, la rapidez de la luz es exactamente

$$\text{Rapidez de la luz} = 299\,792\,458 \text{ metros por segundo} \tag{1.1}$$

Así, la nueva definición del metro implica la adopción de la rapidez de la luz como un estándar de rapidez.

La tabla 1.1 muestra una lista de distancias y tamaños, de las mayores a las menores. Muchas de las cantidades que aparecen ahí ya se han mencionado en el preludio. Las cantidades que se marcan con un signo $\approx$ (aproximadamente igual) no están definidas con precisión, son aproximaciones gruesas.

La tabla 1.2 es una lista de múltiplos y submúltiplos del metro y sus abreviaturas. Los **prefijos** que se usan en la tabla 1.2 y otros prefijos estándar son abreviaturas de potencias particulares de 10. Los prefijos que representan potencias de 10 y que difieren por factores de 10^3 con frecuencia se usan con cualquier unidad, por conveniencia o concisión. Estos prefijos estándar y sus abreviaturas se enlistan en la tabla 1.3.

En el **Sistema Británico de Unidades**, abandonado por Gran Bretaña y casi todos los demás países, pero lamentablemente todavía en uso en Estados Unidos, la unidad de longitud es el **pie** (abreviado en inglés ft) que es exactamente 0.3048 m. (Para la conversión mental rápida de pies a metros, multiplique por 0.3). La tabla 1.4 proporciona los múltiplos y submúltiplos del pie, aunque se emplearán poco porque en este libro difícilmente se usará alguna vez unidades británicas. Los esfuerzos esporádicos para adoptar las unidades métricas en Estados Unidos han fallado, aunque la mayoría de los fabricantes estadounidenses de automóviles usan ahora unidades métricas y así lo hace también el Ejército de Estados Unidos (observe que, en la jerga del Ejército de Estados Unidos, al kilómetro se le llama "klick", una costumbre recomendable por su brevedad).

TABLA 1.1 ALGUNAS DISTANCIAS Y TAMAÑOS

Distancia hasta la frontera del universo observable	$\approx 1 \times 10^{26}$ m
Distancia hasta la galaxia de Andrómeda *a*)	2.1×10^{22} m
Diámetro de nuestra galaxia	7.6×10^{20} m
Distancia a la estrella más cercana (Próxima Centauro)	4.0×10^{16} m
Distancia de la Tierra al Sol	1.5×10^{11} m
Radio de la Tierra	6.4×10^{6} m
Longitud de onda de la onda de radio (banda AM)	$\approx 3 \times 10^{2}$ m
Longitud del barco *Queen Elizabeth b*)	3.1×10^{2} m
Altura del varón promedio	1.8 m
Diámetro de una moneda de 5 centavos de Estados Unidos *c*)	2.1×10^{-2} m
Diámetro de un glóbulo rojo sanguíneo (humano)	7.5×10^{-6} m
Longitud de onda de la luz visible	$\approx 5 \times 10^{-7}$ m
Diámetro del virus más pequeño (virus PSTV de la papa) *d*)	2×10^{-8} m
Diámetro del átomo	$\approx 1 \times 10^{-10}$ m
Diámetro del núcleo atómico (hierro)	$\approx 8 \times 10^{-15}$ m
Diámetro del protón	$\approx 2 \times 10^{-15}$ m

a)

b)

c)

d)

TABLA 1.2 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DEL METRO

kilómetro (klick)	1 km = 10^{3} m
metro	1 m
centímetro	1 cm = 10^{-2} m
milímetro	1 mm = 10^{-3} m
micrómetro (micra)	1 μm = 10^{-6} m
nanómetro	1 nm = 10^{-9} m
angstrom	1 Å = 10^{-10} m
picómetro	1 pm = 10^{-12} m
femtómetro (fermi)	1 fm = 10^{-15} m

TABLA 1.3 PREFIJOS PARA LAS UNIDADES

FACTOR DE MULTIPLICACIÓN	PREFIJO	SÍMBOLO
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	mega	M
10^{3}	kilo	k
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z

TABLA 1.4 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DEL PIE

milla	1 mi = 5 280 pies = 1 609.38 m
yarda	1 yd = 3 pies = 0.9144 m
pie	1 pie = 0.3048 m
pulgada	1 pulg = $\frac{1}{12}$ pie = 2.540 cm
mil	1 mil = 0.001 pulg

Revisión 1.2

PREGUNTA 1: ¿Cuántos centímetros hay en un kilómetro? ¿Cuántos milímetros hay en un kilómetro?

PREGUNTA 2: ¿Cuántas micras hay en un fermi?

PREGUNTA 3: ¿Cuántas micras hay en un angstrom?

(A) 10^{6} (B) 10^{4} (C) 10^{-4} (D) 10^{-6}

1.3 LA UNIDAD DE TIEMPO

La unidad de tiempo es el segundo. Originalmente, un segundo se definía como $1/(60 \times 60 \times 24)$ o 1/86 400 de un día solar medio. El día solar es el intervalo que tarda la Tierra en completar una rotación sobre sí misma. La longitud del día solar depende de la rapidez de rotación de la Tierra, que está sujeta a una multitud de variaciones menores, tanto estacionales como de largo plazo, que pueden hacer que la rotación de nuestro planeta sea un cronómetro imperfecto.

Para evitar cualquier variación en la unidad de tiempo, ahora se usa un estándar atómico de tiempo. Éste es el periodo de una vibración de microondas emitidas por un átomo de cesio. El **segundo** (1 s) se define como el tiempo necesario para que se realicen 9 192 631 770 vibraciones de un átomo de cesio. La figura 1.9 muestra uno de los relojes atómicos en el National Institute of Standards and Technology (NIST), en Boulder, Colorado, Estados Unidos. En este reloj, las débiles vibraciones de los átomos de cesio se amplifican a un nivel que permite controlar el cuadrante del reloj. Los buenos relojes de cesio son muy, muy buenos: se atrasan o se adelantan no más de 1 segundo en 20 millones de años.

La estación de radio WWV, de Fort Collins, Colorado, transmite continuamente señales precisas de tiempo vinculadas a los relojes atómicos de cesio del NIST. Estas señales pueden recibirse en todo el mundo en receptores de radio de onda corta sintonizados a 2.5, 5, 10, 15 o 20 MHz. También se anuncian continuamente señales precisas de tiempo por teléfono [en Estados Unidos, el número de teléfono es (303) 499-7111); la hora precisa también está disponible en línea en www.time.gov.]. La hora que se anuncia en la radio y en el teléfono es la hora universal coordinada, o tiempo de Greenwich, que está exactamente 5 horas adelante de la Hora Estándar del Este de Estados Unidos (Eastern Standard Time).

La tabla 1.5 presenta una lista de algunos intervalos típicos de tiempo y la tabla 1.6 proporciona múltiplos y submúltiplos del segundo.

FIGURA 1.9 Reloj atómico de cesio en el National Institute of Standards and Technology.

TABLA 1.5 ALGUNOS INTERVALOS DE TIEMPO

Edad del universo	$\approx 4 \times 10^{17}$ s
Edad del Sistema Solar	1.4×10^{17} s
Edad de los fósiles más antiguos conocidos	1.1×10^{17} s
Edad de la especie humana	7.9×10^{12} s
Edad de los registros escritos más antiguos (sumerios)	1.6×10^{11} s
Duración de la vida del ser humano (promedio)	2.2×10^{9} s
Tiempo de viaje de la luz desde la estrella más cercana	1.4×10^{8} s
Revolución de la Tierra alrededor del Sol (1 año)	3.2×10^{7} s
Rotación de la Tierra (1 día)	8.6×10^{4} s
Duración de la vida del neutrón libre (promedio)	9.2×10^{2} s
Tiempo de viaje de la luz desde el Sol	5×10^{2} s
Tiempo de viaje de la luz desde la Luna	1.3 s
Periodo del latido del corazón (humano)	≈ 0.9 s
Periodo de la onda sonora (Do medio)	3.8×10^{-3} s
Periodo de la onda de radio (banda AM)	$\approx 1 \times 10^{-6}$ s
Periodo de la onda de luz	$\approx 2 \times 10^{-15}$ s
Duración de la vida de la partícula inestable de vida más corta	$\approx 10^{-24}$ s

TABLA 1.6 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DEL SEGUNDO

siglo	1 siglo = 100 años = 3.156×10^9 s
año	1 año = 3.156×10^7 s = 365.25 días
día	1 día = 84 600 s
hora	1 h = 3 600 s
minuto	1 min = 60 s
milisegundo	1 ms = 10^{-3} s
microsegundo	1 μs = 10^{-6} s
nanosegundo	1 ns = 10^{-9} s
picosegundo	1 ps = 10^{-12} s
femtosegundo	1 fs = 10^{-15} s

Conceptos en contexto

EJEMPLO 1 El dispositivo láser medidor de distancias que se muestra en la foto del capítulo es capaz de medir el tiempo de viaje de un pulso de luz con una precisión mejor que una milmillonésima de segundo. ¿Qué tan lejos viaja la luz en una milmillonésima de segundo (un nanosegundo)?

SOLUCIÓN: La distancia que viaja la luz en un nanosegundo es

$$\begin{aligned}
[\text{distancia}] &= [\text{rapidez}] \times [\text{tiempo}] \\
&= \left(2.997\,924\,58 \times 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times (1.0 \times 10^{-9}\ \text{s}) \\
&= (2.997\,924\,58 \times 1.0) \times (10^8 \times 10^{-9}) \times \left(\frac{\text{m}}{\cancel{\text{s}}} \times \cancel{\text{s}}\right) \\
&\approx 3.0 \times (10^{-1}) \times (\text{m}) \\
&= 30\ \text{cm}
\end{aligned}$$

o, en unidades británicas, casi un pie. La regla que aparece dibujada diagonalmente a través de esta página muestra la distancia que viaja la luz en 1 nanosegundo.

Revisión 1.3

PREGUNTA 1: ¿Cuántos milisegundos hay en una hora? ¿Cuántos picosegundos hay en un microsegundo?

PREGUNTA 2: ¿Cuántos femtosegundos hay en un minuto?

(A) 3.6×10^{18} (B) 6.0×10^{16} (C) 6.0×10^{15}

(D) 1.7×10^{13} (E) 1.7×10^{14}

1.4 LA UNIDAD DE MASA

La unidad de masa es el kilogramo. El patrón de masa es un cilindro de aleación de platino-iridio que se conserva en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (véase la figura 1.10). El **kilogramo** (1 kg) se define como exactamente igual a la masa de este cilindro. La masa es la única unidad fundamental para la cual no se tiene, hasta ahora, un estándar atómico.

La masa se mide con una balanza, un instrumento que compara el *peso* de una masa desconocida con una fuerza conocida, tales como el peso de una masa estándar y la tracción de un resorte calibrado. El peso es directamente proporcional a la masa y, por tanto, pesos iguales implican masas iguales (la distinción precisa entre masa y peso se explica en detalle en el capítulo 5). La figura 1.11 muestra una balanza de watts diseñada por el NIST. Es una balanza de resorte; pero, en vez de una suspensión con resorte mecánico, usa una suspensión magnética con fuerzas magnéticas calibradas.

Para relacionar la masa de un átomo con la masa del kilogramo, se necesita saber el **número de Avogadro** N_A, o el número de átomos por mol. Un **mol** *de cualquier elemento químico (o de cualquier compuesto químico) es la cantidad de materia que contiene tantos átomos (o moléculas) como los átomos que hay en exactamente 12 gramos de carbono-12*. La "masa atómica" de un elemento químico (o la "masa molecular" de un compuesto) es la masa de un mol expresada en gramos. Así, de acuerdo con la tabla de masas atómicas que aparece en el apéndice 8, un mol de átomos de carbono (C) tiene una masa de 12.0 gramos; un mol de átomos de hidrógeno (H) tiene una masa de 1.0 gramo; un mol de átomos de oxígeno (O) tiene una masa de 16.0 gramos; un mol de moléculas de oxígeno (O_2) tiene una masa de 32.0 gramos; un mol de moléculas de agua (H_2O) tiene una masa de 18.0 gramos, y así sucesivamente.

Los datos experimentales disponibles dan el siguiente valor para N_A:

$$N_A = 6.022\,14 \times 10^{23} \text{ átomos o moléculas por mol} \tag{1.2}$$

Como hay N_A átomos en un mol, la masa de un átomo es la masa de un mol, o "masa atómica", dividida entre N_A:

$$[\text{masa del átomo}] = \frac{[\text{"masa atómica"}]}{N_A} \tag{1.3}$$

Por tanto, la masa de, digamos, un átomo de carbono-12 es

$$[\text{masa del átomo carbono-12}] = \frac{12 \text{ gramos}}{6.022\,14 \times 10^{23}} = 1.992\,65 \times 10^{-23} \text{ gramo}$$

$$= 1.992\,65 \times 10^{-26} \text{ kg} \tag{1.4}$$

Las masas de los átomos se miden con frecuencia en términos de la **unidad de masa atómica** (1 u), que es exactamente $\frac{1}{12}$ de la masa del átomo de carbono-12:

$$\text{unidad de masa atómica} = 1 \text{ u} = \frac{1.992\,65 \times 10^{-26} \text{ kg}}{12} \tag{1.5}$$

Es decir:

$$1 \text{ u} = 1.660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg} \tag{1.6}$$

Obsérvese que, con esta definición de la unidad de masa atómica, la "masa atómica", o el número de gramos en un mol, tiene necesariamente el mismo valor numérico que la masa de un átomo expresado en u. Así, el átomo de carbono tiene una masa de 12 u; el átomo de hidrógeno, una masa de 1.0 u; el átomo de oxígeno, una masa de 16.0 u, y así sucesivamente.

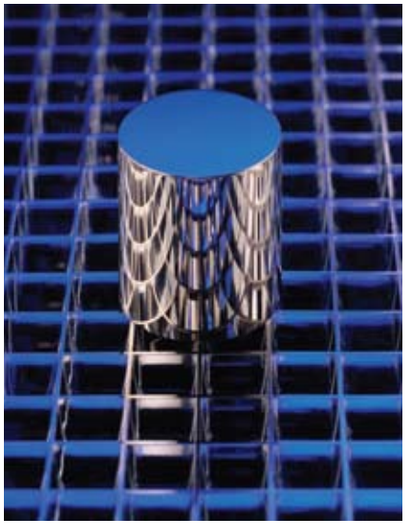


FIGURA 1.10 Kilogramo patrón internacional.

FIGURA 1.11 Una balanza de alta precisión.

EJEMPLO 2 ¿Cuántos átomos hay en una moneda de 5 centavos de Estados Unidos? Suponga que la moneda está hecha de níquel y tiene una masa de 5.2×10^{-3} kg, o 5.2 gramos. Las masas atómicas aparecen en el apéndice 8.

SOLUCIÓN: Recuérdese que la masa atómica es la masa de un átomo expresada en u. De acuerdo con la tabla periódica de elementos químicos que aparece en el apéndice 8, la masa atómica del níquel es 58.69. Así, la masa de un átomo de níquel es 58.69 u, o $58.69 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg $= 9.74 \times 10^{-26}$ kg. El número de átomos en 5.2×10^{-3} kg es, por tanto:

$$\frac{5.2 \times 10^{-3}\ \cancel{\text{kg}}}{9.74 \times 10^{-26}\ \cancel{\text{kg}}/\text{átomo}} = 5.3 \times 10^{22}\ \text{átomos}$$

La tabla 1.7 da algunos ejemplos de masas expresadas en kilogramos y la tabla 1.8 es una lista de múltiplos y submúltiplos del kilogramo. En el sistema británico de unidades, la unidad de masa es la **libra**, que es exactamente 0.45359237 kg.

Para calcular con rapidez la relación aproximada entre unidades británicas y métricas, recuérdense las siguientes igualdades aproximadas, buenas dentro de ±10% (factores de conversión más exactos se tabulan en el apéndice 7):

1 yarda ≈ 1 m
1 milla ≈ 1.6 km
1 libra ≈ $\frac{1}{12}$ kilogramo
1 cuarto de galón ≈ 1 litro
1 galón ≈ 4 litros

TABLA 1.7 ALGUNAS MASAS

Universo observable	$\approx 10^{53}$ kg
Galaxia	4×10^{41} kg
Sol	2.0×10^{30} kg
Tierra *a*)	6.0×10^{24} kg
Barco *Queen Elizabeth*	7.6×10^{7} kg
Avión jet de pasajeros (Boeing 747), vacío	1.6×10^{5} kg
Automóvil *b*)	1.5×10^{3} kg
Hombre (varón promedio)	73 kg
Manzana *c*)	0.2 kg
Moneda de 5 centavos de Estados Unidos	5.2×10^{-3} kg
Gota de lluvia	2×10^{-6} kg
Glóbulo rojo de la sangre *d*)	9×10^{-14} kg
El virus más pequeño (PSTV de la patata)	4×10^{-21} kg
Átomo (hierro)	9.5×10^{-26} kg
Protón	1.7×10^{-27} kg
Electrón	9.1×10^{-31} kg

a)

b)

c)

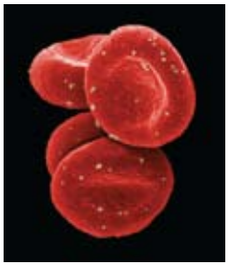
d) 

TABLA 1.8 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DEL KILOGRAMO

tonelada métrica	$1\ \text{t} = 10^3\ \text{kg}$
kilogramo	$1\ \text{kg}$
gramo	$1\ \text{g} = 10^{-3}\ \text{kg}$
miligramo	$1\ \text{mg} = 10^{-6}\ \text{kg}$
microgramo	$1\ \mu\text{g} = 10^{-9}\ \text{kg}$
unidad de masa atómica	$1\ \text{u} = 1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg}$
libra	$1\ \text{lb} = 0.454\ \text{kg}$
onza	$1\ \text{oz} = 28.3\ \text{g}$
tonelada inglesa	$1\ \text{ton} = 907\ \text{kg}$

Para obtener un mejor manejo de las unidades métricas, ayuda saber que:

- La altura de una persona es, comúnmente, 1.6 a 1.8 m.
- La masa de una persona es, comúnmente, 60 a 75 kg.
- La distancia del eje central del cuerpo a la mano estirada es alrededor de 1 m.

Revisión 1.4

PREGUNTA 1: ¿Cuántos gramos hay en una tonelada métrica? ¿Cuántas toneladas métricas hay en un miligramo?

PREGUNTA 2: ¿Cuántas unidades de masa atómica (u) hay en un kilogramo?

(A) 1.66×10^{-26} (B) 1.66×10^{-23} (C) 6.02×10^{23} (D) 6.02×10^{26}

1.5 UNIDADES DERIVADAS

El metro, el segundo y el kilogramo son las unidades fundamentales, o **unidades básicas** del sistema métrico de unidades. Cualquier otra cantidad física puede medirse introduciendo una **unidad derivada**, *que se construye mediante alguna combinación de las unidades básicas*. Por ejemplo, **área** puede medirse con una unidad derivada que es el cuadrado de la unidad de longitud; así, en el sistema métrico, la unidad de área es el metro cuadrado ($1\ \text{m} \times 1\ \text{m} = 1\ \text{m}^2$), que es el área de un cuadrado de un metro por lado (figura 1.12*a*). Y el **volumen** puede medirse con una unidad derivada que es el cubo de la unidad de longitud; en el sistema métrico, la unidad de volumen es el metro cúbico ($1\ \text{m} \times 1\ \text{m} \times 1\ \text{m} = 1\ \text{m}^3$), que es el volumen de un cubo de un metro por lado (figura 1.12*b*). Las tablas 1.9 y 1.10 proporcionan múltiplos y submúltiplos de estas unidades.

De manera similar, la **densidad** o masa por unidad de volumen, puede medirse con una unidad derivada que es la relación de la unidad de masa y la unidad de volumen. En el sistema métrico, la unidad de densidad es el kilogramo por metro cúbico ($1\ \text{kg/m}^3$). Por ejemplo, la densidad del agua es $1\,000\ \text{kg/m}^3$, que significa que un metro cúbico de agua tiene una masa de 1 000 kilogramos. En capítulos posteriores se verá que otras cantidades físicas, tales como rapidez, aceleración, fuerza, etc., se miden también con unidades derivadas.

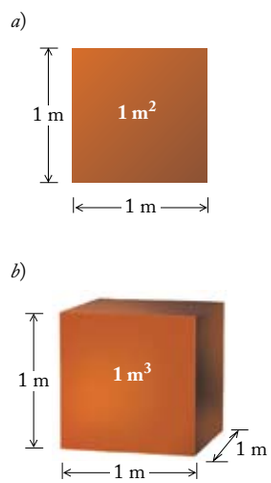


FIGURA 1.12 *a*) Un metro cuadrado. *b*) Un metro cúbico.

TABLA 1.9 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DEL METRO CUADRADO

metro cuadrado	$1\ m^2$
kilómetro cuadrado	$1\ km^2 = 10^6\ m^2$
centímetro cuadrado	$1\ cm^2 = 10^{-4}\ m^2$
milímetro cuadrado	$1\ mm^2 = 10^{-6}\ m^2$

TABLA 1.10 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DEL METRO CÚBICO

metro cúbico	$1\ m^3$
kilómetro cúbico	$1\ km^3 = 10^9\ m^3$
litro	$1\ litro = 10^{-3}\ m^3$
centímetro cúbico	$1\ cm^3 = 10^{-6}\ m^3$
milímetro cúbico	$1\ mm^3 = 10^{-9}\ m^3$

El Sistema Internacional de Unidades, o SI, que se usa en este libro es el sistema más ampliamente aceptado de unidades en la ciencia y en la ingeniería. Se basa en el metro, el segundo y el kilogramo, además de una unidad especial para la temperatura y una unidad especial para la corriente eléctrica.

Revisión 1.5

PREGUNTA 1: ¿Cuántos centímetros cuadrados hay en un metro cuadrado? ¿Cuántos centímetros cúbicos hay en un metro cúbico?

PREGUNTA 2: ¿Cuántos milímetros cúbicos hay en un kilómetro cuadrado?

PREGUNTA 3: ¿Cuántos milímetros cúbicos hay en un kilómetro cúbico?

(A) 10^{-18} (B) 10^{-6} (C) 10^{6} (D) 10^{18}

1.6 CIFRAS SIGNIFICATIVAS; COHERENCIA DE UNIDADES Y CONVERSIÓN DE UNIDADES

Cifras significativas

Los números que aparecen en las tablas 1.1, 1.5 y 1.7 se escriben en notación científica, con potencias de 10. Esto no sólo tiene la ventaja de poder escribir en forma compacta números muy grandes o muy pequeños, sino que también sirve para indicar la precisión de los números. Por ejemplo, un científico que hubiera visto el maratón de Berlín de 1988 en el que Ronaldo da Costa estableció el récord mundial de 2 h 6 min 5.0 s, habría reportado el tiempo de la carrera como 7.5650×10^3 s , o 7.565×10^3 s, o $7.57 \times$

10^3 s, o 7.6×10^3 s, dependiendo de si la medición de tiempo se hizo con un cronógrafo o con un reloj de pulsera con segundero (pero sin botón de detención), o con un reloj de pulsera sin segundero, o con un reloj "de diseñador" con una de esas carátulas idiotas en blanco sin ningún número. La primera de estas opciones permite hacer mediciones con una precisión dentro de 1/10 s; la segunda, dentro de aproximadamente 1 s; la tercera, dentro de 10 o 20 s, y la cuarta dentro de 1 o 2 minutos (si el científico es bueno para adivinar la posición de la manecilla en la carátula en blanco). En este libro se adoptará la regla de que sólo se escriben dígitos, o **cifras significativas**, si se sabe que son confiables de modo razonable. De acuerdo con esta regla, el número 7.5650×10^3 s comprende cinco cifras significativas, de las cuales la última (0) representa décimas de segundo; el número 7.565×10^3 s comprende cuatro cifras significativas, de las cuales la última (5) representa segundos y así de manera sucesiva. De esta forma, la notación científica proporciona una indicación inmediata de la precisión dentro de la cual se ha medido el número.

Cuando en los cálculos se multiplican o dividen números en notación científica, el resultado final debe siempre redondearse de manera que no tenga más cifras significativas que los números originales, porque el resultado final no puede ser más preciso que los números originales en los que se basó. Así, el resultado de multiplicar 7.57×10^3 s por 7.57×10^3 s es 5.73049×10^4 s^2, que debe redondearse a 5.73×10^4 s^2, porque había sólo tres cifras significativas en los números originales. Cuando se suman o restan números, el resultado debe redondearse al más grande lugar decimal entre los últimos dígitos de los números originales. Así, $89.23 + 5.7 = 94.93$, debe redondearse a 94.9 porque uno de los números originales se conoce sólo hasta el lugar de las décimas.

EJEMPLO 3 El dispositivo láser de medición de distancias de un topógrafo mide un intervalo de tiempo de 1.176×10^{-6} s para el viaje de ida y vuelta de un pulso de luz láser a un marcador. ¿Cuál es la distancia de viaje redondo, expresada con el número correcto de cifras significativas?

Conceptos en contexto

SOLUCIÓN: La distancia que la luz viaja en un intervalo de tiempo de 1.176×10^{-6} s es

$$\begin{aligned}[\text{distancia}] &= [\text{rapidez}] \times [\text{tiempo}] \\ &= \left(2.997\,924\,58 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\cancel{\text{s}}}\right) \times (1.176 \times 10^{-6}\,\cancel{\text{s}}) \qquad (1.7) \\ &= 352.6 \text{ m}\end{aligned}$$

donde el resultado que aparece en una calculadora, 352.555 930 6 m, se ha redondeado en el último paso a 352.6 m; es decir, al mismo número de dígitos del factor conocido menos preciso a partir del cual se calculó. Esta precisión de fracción de metro concuerda con la distancia calculada para un intervalo de un nanosegundo en el ejemplo 1.

Algunas veces, incluso un número conocido con muchas cifras significativas se redondea a menos cifras significativas por conveniencia, cuando no se necesita alta precisión. Por ejemplo, el valor exacto de la rapidez de la luz es $2.997\,924\,58 \times 10^8$ m/s; pero para la mayoría de los fines, es adecuado redondear este valor a 3.00×10^8 m/s y con frecuencia se emplea este valor aproximado de la rapidez de la luz en los cálculos.*

* Al redondear un número, se emplea la siguiente regla (por ejemplo, en una calculadora de mano): si el primer dígito de los que se van a eliminar en el redondeo está entre 5 y 9, el dígito anterior se aumenta en 1 ("se redondea hacia arriba"); si el primer dígito de los que se van a eliminar es de 0 a 4, el dígito anterior permanece sin cambio ("redondeo hacia abajo").

Consistencia de las unidades

En todas las ecuaciones de física, las unidades del lado izquierdo y del lado derecho de la ecuación deben ser coherentes. Esta coherencia se ilustra por los cálculos del ejemplo 3, donde se ve que en el lado derecho de la ecuación (1.7), las unidades de tiempo se cancelan y el resultado final para el lado derecho tiene entonces unidades de longitud, en concordancia con las unidades del lado izquierdo, que es una distancia y requiere unidades de longitud. Una regla general es que en cualquier cálculo con ecuaciones de física, las unidades pueden multiplicarse y dividirse como si fueran cantidades algebraicas, lo que automáticamente da unidades correctas para el resultado final. Este requisito de consistencia de las unidades en las ecuaciones de física puede formularse de manera más general como un requisito de consistencia de dimensiones. En este contexto, se dice que las **dimensiones** de una cantidad física son longitud, tiempo, masa o algún producto o alguna relación de éstas si las unidades de esta cantidad física son las de longitud, tiempo, masa o algún producto o alguna relación de éstas. Así, el volumen tiene las dimensiones de $[\text{longitud}]^3$, la densidad tiene las dimensiones de $[\text{masa}]/[\text{longitud}]^3$, la rapidez tiene las dimensiones de [longitud]/[tiempo] y así sucesivamente. En cualquier ecuación de física, *las dimensiones de ambos lados de la ecuación deben ser las mismas.* Por ejemplo, puede probarse la consistencia de la ecuación (1.7) examinando las dimensiones de las cantidades que aparecen en esta ecuación:

$$[\text{longitud}] = \frac{[\text{longitud}]}{[\text{tiempo}]} \times [\text{tiempo}] \tag{1.8}$$

Las dimensiones se usan a menudo en pruebas preliminares de la consistencia de las ecuaciones, cuando se sospecha que hay algún error en la ecuación. Una prueba de la coherencia de las ecuaciones no nos dice más que la prueba de la consistencia de las unidades, pero tiene la ventaja de que no es necesario comprometerse con una elección especial de unidades ni preocuparse por las conversiones entre múltiplos y submúltiplos de las unidades. Tómese en cuenta que si una ecuación no pasa esta prueba de consistencia, se confirma que está equivocada; pero si pasa la prueba, esto no asegura que esté correcta.

Algunas veces, las dimensiones se usan para encontrar relaciones entre cantidades físicas. Una determinación así de la proporcionalidad correcta entre potencias de cantidades pertinentes se llama **análisis dimensional**. Éste se realiza exigiendo la consistencia de las dimensiones de las unidades en cada lado de una ecuación. El análisis dimensional resultará útil cuando haya más familiaridad con más cantidades físicas y sus dimensiones.

El desastroso fin de la misión espacial *Mars Climate Orbiter* el 3 de diciembre de 1999 (véase la figura 1.13) enseña una lección sobre la importancia de poner siempre unidades junto con una cantidad. Los ingenieros de Lockheed Martin proporcionaron los datos operativos del artefacto espacial, necesarios para la navegación, en unidades británicas en vez de métricas. Los controladores de vuelo supusieron que los datos estaban en unidades métricas; así, la sonda espacial no se comportó como se esperaba cuando se encendieron los cohetes de empuje pertinentes cerca de Marte. La misión de 155 000 000 de dólares fue una pérdida total cuando la nave espacial entró a la atmósfera y se estrelló, en vez de orbitar alrededor de Marte.

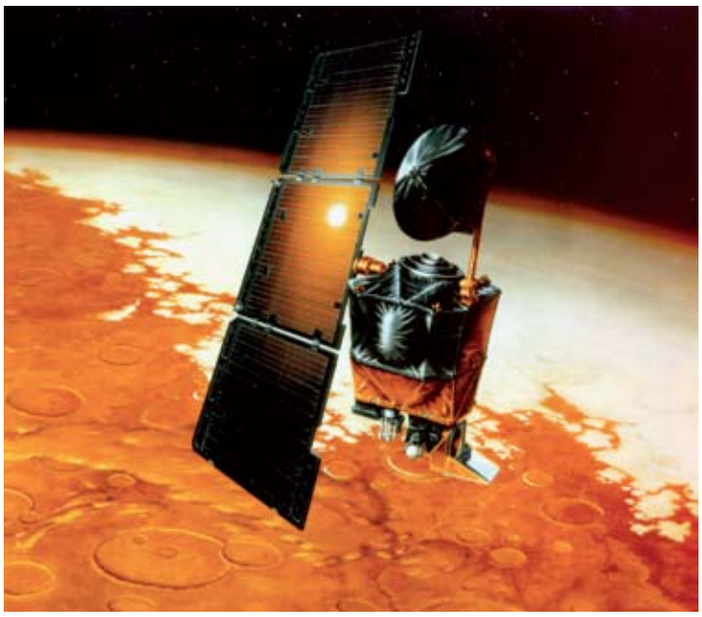


FIGURA 1.13 Representación artística de la nave espacial *Mars Climate Orbiter.*

Conversión de unidades

En muchos cálculos, es necesario convertir cantidades expresadas en un sistema de unidades a otro sistema de unidades. Tales conversiones no

requieren más que sencillas sustituciones de cantidades equivalentes en los dos sistemas (puede encontrarse una lista muy completa de cantidades equivalentes en diferentes unidades en el apéndice 7). Por ejemplo, la densidad del agua es 1.000×10^3 kg/m^3. Para expresar esto en g/cm^3, se sustituye 1 kg = 1 000 g y 1 m = 100 cm y se encuentra

$$1.000 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.000 \times 10^3 \times \frac{1\,000\ \text{g}}{(100\ \text{cm})^3} = 1.000 \times 10^3 \times \frac{10^3\ \text{g}}{10^6\ \text{cm}^3}$$

$$= 1.000 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Un método alternativo para la conversión de unidades de un sistema a otro utiliza la multiplicación por factores que son idénticamente iguales a 1. Como 1 kg = 1 000 g, se tiene la identidad

$$1 = \frac{1\,000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}$$

y de modo similar,

$$1 = \frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}}$$

Esto significa que cualquier cantidad puede multiplicarse por (1 000 g)/(1 kg) o (1 m)/(100 cm) sin cambiar su valor. Así, comenzando con 1.000×10^3 kg/m^3, se obtiene

$$1.000 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.000 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1\,000\ \text{g}}{1\ \text{kg}} \times \frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}} \times \frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}} \times \frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}}$$

$$= 1.000 \times 10^3 \times 1\,000 \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{100} \times \frac{\cancel{\text{kg}}}{\cancel{\text{m}^3}} \times \frac{\text{g}}{\cancel{\text{kg}}} \times \frac{\cancel{\text{m}^3}}{\text{cm}^3}$$

Haciendo las multiplicaciones y cancelando el kg y el m^3, se encuentra

$$1.000 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.000 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \tag{1.9}$$

Relaciones tales como (1 000 g)/(1 kg) o (1 m)/(100 cm), que son idénticamente iguales a 1, se llaman **factores de conversión**. Para cambiar las unidades de una cantidad, simplemente se multiplica la cantidad por uno o varios factores de conversión que producirán la cancelación deseada de las viejas unidades.

La relación cociente de dos cantidades con dimensiones o unidades idénticas no tendrá ninguna dimensión. Por ejemplo, la **pendiente** de una trayectoria en relación con la dirección horizontal se define como la relación del incremento de altura al incremento de distancia horizontal. Como ésta es la relación de dos longitudes, es una cantidad adimensional. Del mismo modo, el seno de un ángulo se define como la relación de dos longitudes; en un triángulo rectángulo, el seno de uno de los ángulos agudos es igual a la longitud del lado opuesto dividida entre la longitud de la hipotenusa (véase Ayuda matemática: Trigonometría del triángulo rectángulo, para un repaso). Así, la pendiente, el seno, el coseno y la tangente de un ángulo son ejemplos de **cantidades adimensionales**.

EJEMPLO 4 Inmediatamente después del despegue, un avión jet de pasajeros se eleva alejándose de la pista en un ángulo ascendente de 12° (véase la figura 1.14). ¿Cuál es la pendiente de la trayectoria de ascenso del avión? ¿Qué altitud alcanza a una distancia horizontal de 2 000 m o 2.0 km desde el punto de despegue?

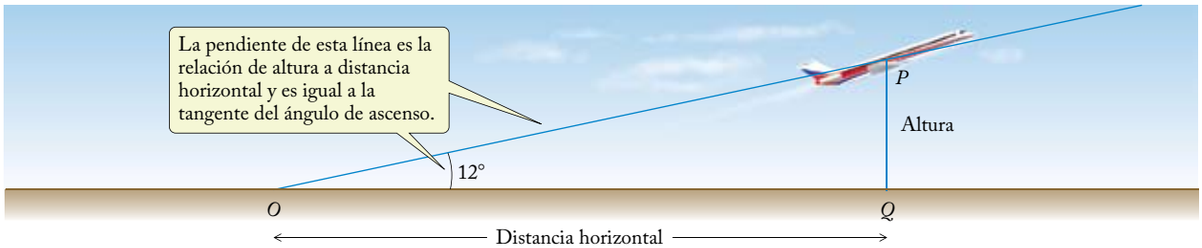


FIGURA 1.14 Un jet de pasajeros toma altura después del despegue.

SOLUCIÓN: Si P es un punto de la trayectoria a la distancia horizontal OQ y a una altura PQ (véase la figura 1.13), entonces la pendiente de la trayectoria es

$$[\text{pendiente}] = \frac{[\text{altura}]}{[\text{distancia horizontal}]} = \frac{PQ}{OQ} \tag{1.10}$$

La trigonometría dice que en el triángulo rectángulo OPQ, la relación PQ/OQ es la tangente del ángulo θ (véase el recuadro de Ayuda matemática); por tanto,

$$[\text{pendiente}] = \tan\theta$$

Con la calculadora, se encuentra que la tangente de 12° es 0.21. Por tanto,

$$[\text{pendiente}] = 0.21$$

Este número adimensional significa que el avión se eleva 0.21 m por cada 1 m que avanza en la dirección horizontal. Frecuentemente, las pendientes se expresan como relaciones; así, una pendiente de 0.21 se puede expresar en la forma alterna 21:100.

Por proporciones, la altura que alcanza el avión en 2 000 metros de avance horizontal debe ser 2 000 veces más grande que la altura por 1 metro de avance horizontal; es decir,

$$[\text{altura}] = 2\,000\ \text{m} \times 0.21 = 4.2 \times 10^2\ \text{m}$$

TÉCNICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS — UNIDADES Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS

En todos los cálculos con ecuaciones de física, siempre incluya las unidades en sus cálculos y multiplíquelas y divídalas como si fueran cantidades algebraicas. Esto automáticamente producirá las unidades correctas para el resultado final. Si no resulta así, usted ha cometido algún error en el cálculo. Por tanto, siempre vale la pena seguir la pista de las unidades en el cálculo, ya que esto da algo de protección extra contra errores costosos. Si las cancelaciones esperadas no ocurren, ¡esto es una señal segura de que hay problemas!

Si es necesario cambiar las unidades de una cantidad, sustituya las unidades viejas por cantidades iguales de unidades nuevas, o bien multiplique las unidades viejas por los factores de conversión que produzcan la cancelación de las unidades viejas.

Siempre redondee su resultado final a tantas cifras significativas como se especifique en los datos que se tiene. Pongamos por caso el ejemplo 3, se redondeó el resultado final a cuatro cifras significativas, ya que se especificaron cuatro cifras significativas en el intervalo de tiempo medido por el dispositivo. Cualquier cifra significativa adicional en el resultado final será no confiable y engañosa. De hecho, incluso las cuatro cifras significativas en la respuesta [ecuación (1.7)] no son suficientemente confiables: el cálculo de un tiempo especificado con una precisión de 1 nanosegundo daría una distancia precisa a sólo 0.3 m, como en el ejemplo 1. Siempre es sensato dudar de la precisión de la última cifra significativa, en el resultado final y (algunas veces) también en los datos iniciales.

EJEMPLO 5 Puede obtenerse un aproximado del tamaño de una molécula mediante el siguiente experimento sencillo. Tome una gota de aceite y deje que se extienda en una superficie lisa de agua. Cuando la película de aceite adquiere su área máxima, consiste en una capa monomolecular, es decir, consiste en una sola capa de moléculas de aceite asentadas una al lado de otra sobre la superficie del agua. Dado que una gota de aceite de 8.4×10^{-7} kg de masa y una densidad de 920 kg/m^3 se extiende como una película de aceite con un área máxima de 0.55 m^2, calcule la longitud de una molécula de aceite.

SOLUCIÓN: El volumen de la gota de aceite es

$$[\text{volumen}] = \frac{[\text{masa}]}{[\text{densidad}]} = \frac{8.4 \times 10^{-7}\ \text{kg}}{920\ \text{kg/m}^3} = 9.1 \times 10^{-10}\ \text{m}^3 \tag{1.11}$$

El volumen de la película de aceite debe ser exactamente el mismo. Este último volumen puede expresarse en términos del espesor y el área de la película de aceite:

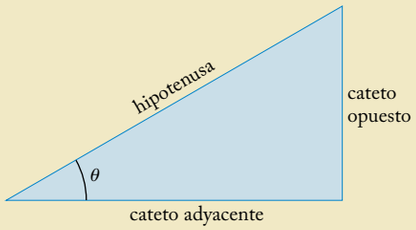
$$[\text{volumen}] = [\text{espesor}] \times [\text{área}]$$

Consecuentemente,

$$[\text{espesor}] = \frac{[\text{volumen}]}{[\text{área}]} = \frac{9.1 \times 10^{-10}\ \text{m}^3}{0.55\ \text{m}^2} = 1.7 \times 10^{-9}\ \text{m} \tag{1.12}$$

Como se dice que la película de aceite consiste en una sola capa de moléculas asentadas una al lado de otra, la longitud de una molécula es la misma que el espesor calculado, 1.7×10^{-9} m.

AYUDA MATEMÁTICA — TRIGONOMETRÍA DEL TRIÁNGULO RECTÁNGULO



Si θ es uno de los ángulos agudos de un triángulo rectángulo, el lado que está enfrente de este ángulo es el *cateto opuesto*; el lado que está junto al ángulo es el *cateto adyacente* y el lado que se encuentra frente al ángulo recto es la *hipotenusa*.

La figura muestra un triángulo rectángulo con un ángulo θ, sus catetos opuesto y adyacente y la hipotenusa. El seno, el coseno y la tangente de θ se definen como sigue:

$$\text{sen}\ \theta = \frac{[\text{cateto opuesto}]}{[\text{hipotenusa}]}$$

$$\cos\theta = \frac{[\text{cateto adyacente}]}{[\text{hipotenusa}]}$$

$$\tan\theta = \frac{[\text{cateto opuesto}]}{[\text{cateto adyacente}]}$$

El teorema de Pitágoras establece que

$$[\text{hipotenusa}]^2 = [\text{cateto opuesto}]^2 + [\text{cateto adyacente}]^2$$

Este teorema implica que $1 = \text{sen}^2\ \theta + \cos^2\theta$.

En principio, el valor numérico del seno, del coseno o de la tangente de cualquier ángulo puede encontrarse trazando un triángulo rectángulo con este ángulo, midiendo sus lados y calculando las relaciones dadas en las definiciones. En la práctica, los valores numéricos de las tangentes, los cosenos y los senos se obtienen mediante calculadoras electrónicas de mano.

El apéndice 3 da un repaso adicional de trigonometría.

Revisión 1.6

PREGUNTA 1: Si usted usa una regla ordinaria marcada en milímetros, ¿hasta cuántas cifras significativas puede medir la longitud, la anchura y el espesor de su libro de texto? Del mismo modo, ¿hasta cuántas cifras significativas puede usted calcular el volumen?

PREGUNTA 2: ¿Cuántas cifras significativas hay en los siguientes números: 7.3, 1.24, 12.4, 4.85×10^6?

PREGUNTA 3: Usted multiplica 7.3 y 1.24. ¿Cuántas cifras significativas hay en el resultado?

PREGUNTA 4: Usted suma 73 y 1.2×10^2. ¿Cuál es el resultado? ¿Cuántas cifras significativas hay en él?

PREGUNTA 5: ¿Cuál es el factor de conversión de m a km?; ¿y el de km a m?; ¿y el de cm a km?; ¿y el de m^2 a km^2?; ¿y el de m^3 a km^3?; ¿y el de m/s a mi/h?

PREGUNTA 6: ¿Cuál es el factor de conversión de m/s a km/h?

(A) $(1\ km/10^3\ m) \times (3\,600\ s/1\ h)$ (B) $(10^3\ km/1\ m) \times (3\,600\ s/1\ h)$
(C) $(10^3\ m/1\ km) \times (3\,600\ s/1\ h)$ (D) $(10^3\ m/1\ km) \times (1\ h/3\,600\ s)$
(E) $(10^3\ m/1\ km) \times (3\,600\ h/1\ s)$

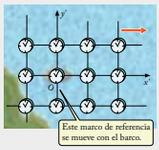
RESUMEN

TÉCNICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS Unidades y cifras significativas **(página 18)**

AYUDA MATEMÁTICA Trigonometría del triángulo rectángulo **(página 19)**

PARTÍCULA IDEAL Una masa puntual, cuyo movimiento puede describirse completamente, dando su posición como función del tiempo.

MARCO DE REFERENCIA Un sistema de coordenadas con un conjunto de relojes sincronizados.



UNIDADES SI DE LONGITUD, TIEMPO Y MASA Metro, segundo, kilogramo.

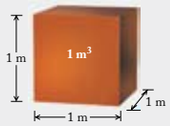
ESTÁNDARES DE LONGITUD, TIEMPO Y MASA Rapidez de la luz, reloj atómico de cesio y cilindro patrón de platino-iridio.

NÚMERO DE AVOGADRO $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ átomos o moléculas por mol. **(1.2)**

UNIDAD DE MASA ATÓMICA $1\ u = 1.66 \times 10^{-27}$ kg. **(1.4)**

MOL La cantidad de materia que contiene tantos átomos (o moléculas) como en exactamente 12 g de carbono-12.

UNIDADES DERIVADAS Una unidad construida mediante alguna combinación de las unidades básicas de longitud, tiempo y masa.



CIFRAS SIGNIFICATIVAS Los dígitos de un número que se conocen con certeza (el último de estos dígitos a menudo no es completamente confiable). Cuando se multiplican o dividen dos o más cantidades, el resultado tiene el mismo número de cifras significativas que el menor número de cifras significativas en las cantidades originales. Cuando se suman o se restan dos o más cantidades, el número de cifras significativas en el resultado se determina por el más lejano lugar después del punto decimal entre los últimos dígitos en las cantidades originales.

COHERENCIA DE LAS UNIDADES En cualquier ecuación, las dimensiones (las potencias de la longitud, el tiempo y la masa) a cada lado de la ecuación deben ser las mismas.

FACTORES DE CONVERSIÓN La relaciones que son idénticamente iguales a 1, que se usan como factores para cambiar las unidades de una cantidad.

PREGUNTAS PARA DISCUSIÓN

1. Trate de estimar visualmente las longitudes, en centímetros o metros, de unos pocos objetos en su entorno inmediato. Luego mídalos con una regla o con una vara métrica. ¿Cuán buenos fueron sus estimados?
2. ¿Cuán próximo está su reloj ahora del tiempo estándar? ¿Aproximadamente cuántos minutos se adelanta o se atrasa por mes?
3. ¿Qué significa la frase "*un instante en el tiempo*"?
4. Los relojes mecánicos (con péndulos) no se inventaron hasta el siglo x de nuestra era. ¿Qué relojes usaban los antiguos griegos y romanos?
5. Contando en voz alta "uno ciento uno, dos ciento dos, tres ciento tres", etc., con una rapidez moderadamente rápida, usted puede medir segundos con razonable precisión. Trate de medir 30 segundos de esta manera. ¿Qué tan buen tomador de tiempo es usted?
6. Los relojes de péndulo se afectan por la temperatura y la presión del aire. ¿Por qué?
7. En 1761, un cronómetro preciso, construido por John Harrison (véase la figura 1.15) se probó a bordo del buque HMS *Deptford* durante un viaje de 5 meses en el mar. En este viaje, el cronómetro acumuló un error menor de 2 minutos. Por este logro, se otorgó finalmente a Harrison un premio de 20 000 libras esterlinas que había ofrecido el gobierno británico por el descubrimiento de un método preciso para la determinación de la longitud geográfica en el mar. Explique cómo usa un cronómetro y la observación de la posición del Sol en el cielo el navegante de un barco para encontrar la longitud geográfica.

FIGURA 1.15 Cronómetro de Harrison H.4.

8. *Wrinkles in Practical Navegation*, del capitán Lecky, famoso libro de texto del siglo xix sobre navegación celeste, recomienda que cada barco lleve tres cronómetros para la medición precisa del tiempo. ¿Qué puede hacer el navegante con tres cronómetros que no pueda hacer con dos?
9. Suponga que por un desastre natural o un acto vandálico se destruyera el kilogramo patrón de Sèvres. ¿Destruiría esto al sistema métrico?

10. Estime las masas, en gramos y kilogramos, de unos pocos cuerpos en su entorno. Verifique las masas con una balanza si tiene una a la mano.
11. Considere el trozo de papel en el que está escrita esta frase. Si tuviera a su disposición instrumentos adecuados, ¿qué cantidad física podría usted medir en este pedazo de papel? Haga la lista más larga que pueda y dé las unidades. ¿Son todas estas unidades derivadas del metro, el segundo y el kilogramo?
12. ¿Podría tomarse la longitud, el tiempo y la densidad como las tres unidades fundamentales? ¿Qué podríamos usar como estándar de la densidad?
13. ¿Podría tomarse la longitud, la masa y la densidad como las tres unidades fundamentales? ¿Y la longitud, la masa y la rapidez?

PROBLEMAS

1.2 La unidad de longitud

1. ¿Cuál es su altura en pies? ¿Y en metros?
2. Con una regla, mida el espesor de este libro, excluyendo las pastas. Deduzca el espesor de cada una de las páginas que forman el libro.
3. Una cancha de fútbol americano mide 100 yd $\times$ $53\frac{1}{3}$ yd. Exprese cada una de estas longitudes en metros.
4. Si cada paso que usted da es de 0.60 m, ¿cuántos pasos necesita para andar 1 km?
5. La pica es una unidad de longitud que usan los impresores y los diseñadores de libros; 1 pica = $\frac{1}{6}$ pulgada, que es la distancia estándar entre una línea de tipos producida en una máquina de escribir y la siguiente línea (a renglón seguido). ¿Cuántas picas de longitud y anchura mide una hoja estándar de papel de 11 pulgadas de largo y $8\frac{1}{2}$ pulgadas de ancho?
6. Exprese los últimos cuatro elementos de la tabla 1.1 en pulgadas.
7. Exprese las siguientes fracciones de pulgada en milímetros: $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{32}$ y $\frac{1}{64}$ de pulgada.
8. Exprese 1 mil (una milésima de pulgada) en micrómetros (micras). Exprese 1 mm en mils.
9. Las analogías pueden ayudar a menudo a imaginar las distancias muy grandes o muy pequeñas que ocurren en la astronomía o en la física atómica.
   a) Si el Sol fuera del tamaño de una toronja, ¿de qué tamaño sería la Tierra? ¿Qué tan lejos estaría la estrella más cercana?
   b) Si su cabeza fuera del tamaño de la Tierra, ¿de qué tamaño sería un átomo? ¿De qué tamaño sería un glóbulo rojo de la sangre?
10. Uno de los objetos más distantes que observan los astrónomos es el quásar Q1208+1011, a una distancia de 12.4 mil millones de años luz de la Tierra. Si usted quisiera graficar la posición de este quásar a la misma escala que el diagrama en la parte superior de la página XXXVI del Preludio, ¿cuán lejos del centro del diagrama tendría usted que colocar este quásar?
11. A la escala del segundo diagrama de la página XXXVI del prefacio, ¿cuál tendría que ser el tamaño del punto central si tuviera que representar fielmente el tamaño del Sol?
12. Un *interferómetro* usa la imagen que se produce mezclando ondas de luz láser con objeto de medir distancias con extremada precisión. La longitud de onda de las ondas de luz láser que se usa es de 633 nanómetros. Un interferómetro de fibra óptica puede medir una distancia de 10^{-6} veces el tamaño de una longitud de onda. ¿Cómo se compara esta precisión con el diámetro de un átomo?

*13. La *cuerda* de un tornillo se describe a menudo en términos del número de vueltas completas que se necesitan para que el tornillo avance una pulgada (unidades inglesas) o en términos del número de milímetros que avanza el tornillo en una vuelta completa (unidades métricas). Para ajustes delicados, los científicos usan a menudo tornillos, con cuerda de 80 vueltas por pulgada o con una cuerda de 0.5 mm por vuelta. Exprese cada una de éstas en términos del número de micrómetros que avanza el tornillo al girar una vuelta parcial con un ángulo de 5°.

*14. Una milla náutica (nmi) es igual a 1.151 mi, o 1 852 m. Demuestre que la distancia de 1 nmi a lo largo de un meridiano de la Tierra corresponde a un cambio en latitud de 1 minuto de arco.

**15. Una física planta un poste vertical en la línea de agua en la orilla de un lago tranquilo. Cuando ella se para junto al poste, la punta de éste queda al nivel de sus ojos, 175 cm sobre la línea de agua. Ella luego rema a través del lago y camina a lo largo de la línea de agua en la orilla opuesta hasta que se coloca tan lejos del poste que la vista de éste queda totalmente bloqueada por la curvatura de la superficie del lago, es decir, todo el poste queda debajo del horizonte (figura 1.16). Ella encuentra que esto sucede cuando su distancia al poste es de 9.4 km. A partir de esta información, deduzca el radio de la Tierra.

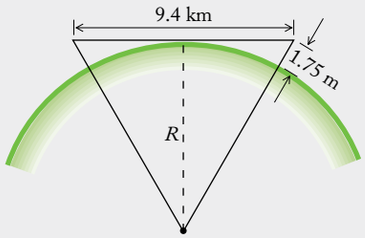


FIGURA 1.16 La distancia entre la física y el poste es de 9.4 km.

1.3 La unidad de tiempo

16. ¿Cuál es su edad en días? ¿Y en segundos?
17. La edad de la Tierra es de 4.5×10^9 años. Exprese esto en segundos.
18. Una computadora puede realizar un solo paso de cálculo cada nanosegundo (10^{-9} s). ¿Cuántos pasos puede realizarse en una hora?
19. Carlos Lopes, de Portugal, estableció un récord olímpico de maratón de 2 h 9 min 21 s en 1984. Exprese el tiempo en segundos.
20. Joan Benoit, de Estados Unidos, estableció el récord olímpico de maratón femenil en 1984, con un tiempo de 2 h 24 min 52 s. Exprese este tiempo en segundos.
21. El día solar es el intervalo en el que la Tierra completa una rotación alrededor de sí misma y el día sideral es el intervalo en el que la Tierra completa una rotación respecto a estrellas distantes. El día solar tiene exactamente 24 horas. ¿Cuántas horas y minutos hay en un día sideral? (Sugerencia: Un año tiene 365.24 días solares, pero 366.24 días siderales. ¿Por qué?)
22. Un reloj mecánico de pulsera hace tic 4 veces por segundo. Suponga que este reloj trabaja durante 10 años. ¿Con qué frecuencia hace tic en este intervalo?
23. ¿A cuántos días equivale 1 millón de segundos?
24. ¿Cuántas horas hay en una semana? ¿Cuántos segundos?
25. Su corazón late 71 veces por minuto. ¿Con qué frecuencia late por año?

*26. Cada día al mediodía, un reloj mecánico de pulsera se comparó con las señales de tiempo de WWV. El reloj no se ajustó. Se atrasaba uniformemente como sigue: 24 de junio, retrasado 4 s; 25 de junio, retrasado 20 s; 26 de junio, retrasado 34 s; 27 de junio, retrasado 51 s.

   a) Para cada uno de los intervalos de 24 horas, calcule la rapidez con la que el reloj de pulsera se retrasó. Exprese su respuesta en segundos de retraso por hora.

   b) ¿Cuál es el promedio de las rapideces de retraso que se encontraron en el inciso *a*)?

   c) Cuando el reloj de pulsera muestra el 30 de junio, ¿cuál es el tiempo correcto WWV? Haga este cálculo con la rapidez promedio de retraso del inciso *b*) y también con las rapideces más altas de retraso que se encontraron en el inciso *a*). Estime con cuántos segundos de precisión puede confiarse en el reloj de pulsera el 30 de junio, después de haber hecho la corrección para la rapidez de retraso.

*27. El navegante de un velero trata de determinar su longitud geográfica observando a qué hora (Coordinated Universal Time: CUT) alcanza el Sol el cenit en su posición (medio día local). Suponga que el cronómetro del navegante está equivocado y está 1.0 segundos retrasado en comparación con el CUT. ¿Cuál será el consecuente error de longitud (en minutos de arco)? ¿Cuál será el error de posición (en kilómetros) si el barco está en el Ecuador?

1.4 La unidad de masa

28. ¿Cuál es su masa en libras? ¿En kilogramos? ¿En unidades de masa atómica?
29. ¿Qué porcentaje de la masa del Sistema Solar está en los planetas? ¿Qué porcentaje está en el Sol? Use los datos de la tabla impresa dentro de la cubierta (guarda) de este libro.
30. ¿Cuál es la relación de la mayor a la menor de las longitudes enlistadas en la tabla 1.1. ¿Cuál es la relación del tiempo más largo al más corto en la tabla 1.5? ¿Cuál es la relación de la masa más grande a la más pequeña en la tabla 1.7? ¿Ve algunas coincidencias (o casi coincidencias) entre estos números? Algunos físicos han propuesto que las coincidencias entre estos grandes números deben explicarse mediante nuevas teorías cosmológicas.
31. El átomo de uranio tiene 92 electrones, cada uno con masa 9.1×10^{-31} kg y un núcleo. ¿Qué porcentaje de la masa total corresponde a los electrones y cuál al núcleo del átomo?
32. Una microbalanza de laboratorio puede medir una masa de una décima de microgramo, una muy pequeña mota de materia. ¿Cuántos átomos hay en una mota así de oro, que tiene 197 gramos en un mol?
33. Las unidades inglesas usan la libra ordinaria, llamada también libra *avoirdupois*, para especificar la masa de la mayoría de clases de cosas; sin embargo, a menudo se usa la libra *troy* para medir piedras preciosas, metales preciosos y medicinas donde 1 libra troy = 0.822 86 libras avoirdupois. Si adoptamos estas libras diferentes, ¿cuántos gramos hay en una libra troy de oro?, ¿y cuántos en una libra avoirdupois de plumas?
34. Los nanoosciladores mecánicos pueden detectar un cambio de masa tan pequeño como 10^{-21} kg. ¿Cuántos átomos de hierro (55.85 g/mol) debe depositarse en un oscilador para producir un cambio de masa medible?
35. *a*) ¿Cuántas moléculas de agua hay en una taza de agua? Una taza contiene alrededor de 250 cm^3.

    b) ¿Cuántas moléculas de agua hay en el océano? El volumen total del océano es de 1.3×10^{18} m^3.

    c) Suponga que vierte una taza de agua en el mar, permite que se mezcle por completo y luego toma una taza de agua del mar. En promedio, ¿cuántas moléculas que estaban originalmente en la taza estarán nuevamente en la taza?

*36. ¿Cuántos átomos hay en el Sol? La masa del Sol es de 1.99×10^{30} kg y su composición química (por masa) es aproximadamente 70% hidrógeno y 30% helio.

*37. La composición química del aire (por masa) es: 75.5% N_2, 23.2% O_2 y 1.3% Ar. ¿Cuál es la "masa molecular" promedio del aire? Es decir, ¿cuál es la masa de 6.02×10^{23} moléculas de aire?

*38. ¿Cuántos átomos hay en un cuerpo humano de 73 kg? La composición química (por masa) del cuerpo humano es: 65% oxígeno, 18.5% carbono, 9.5% hidrógeno, 3.3% nitrógeno, 1.5% calcio, 1% fósforo y 0.35% otros elementos (ignore los "otros elementos" en su cálculo).

1.5 Unidades derivadas
1.6 Cifras significativas; conversión de unidades

39. Como se ve desde la Tierra, el Sol tiene un diámetro angular de 0.53°. La distancia entre la Tierra y el Sol es de 1.5×10^{11} m. A partir de esto, calcule el radio del Sol.
40. El año luz es la distancia que recorre la luz en un año. Exprese el año luz en metros.
41. La distancia de nuestra galaxia a la galaxia de Andrómeda es 2.2×10^{6} años luz. Exprese esta distancia en metros.
42. En una analogía con el año luz, puede definirse el segundo luz como la distancia que recorre la luz en un segundo, y el minuto luz como la distancia que recorre la luz en un minuto. Exprese la distancia Tierra-Sol en minutos luz. Exprese la distancia Tierra-Luna en segundos luz.
43. Los astrónomos usan frecuentemente la unidad astronómica (AU), el parsec (pc) y el año luz. La AU es la distancia de la Tierra al Sol;† una AU = 1.496×10^{11} metros. El pc es la distancia a la que 1 AU subtiende un ángulo de exactamente 1 segundo de arco (figura 1.17). El año luz es la distancia que recorre la luz en 1 año.
    a) Exprese el pc en AU.
    b) Exprese el pc en años luz.
    c) Exprese el pc en metros.

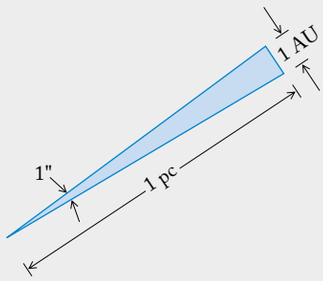


FIGURA 1.17 Geometría que relaciona la unidad astronómica (AU) con el parsec (pc).

44. ¿Cuántos pies cuadrados hay en un metro cuadrado?
45. ¿Cuántos pies cúbicos hay en un metro cúbico?
46. Una cancha de tenis mide 78 pies por 27 pies. Calcule el área de esta cancha. Exprese sus resultados en metros cuadrados.
47. El hombre más alto fue Robert Wadlow, que continuó creciendo durante toda su vida y llegó a una estatura de 8 pies 11.1 pulgadas un poco antes de su muerte en 1940. Exprese su altura en metros. ¿Cuántas cifras significativas hay en su resultado?
48. Un campo de fútbol americano mide 100 yd × $53\frac{1}{3}$ yd. Calcule el área de este campo; exprese sus resultados en metros cuadrados.
49. La densidad del cobre es de 8.9 g/cm^3. Exprese esto en kg/m^3, lb/pie^3 y lb/pulg^3.
50. ¿Cuál es el volumen de un cuerpo humano promedio? (Sugerencia: La densidad del cuerpo es aproximadamente la misma que la del agua.)
51. Su corazón bombea 92 cm^3 de sangre por segundo (en reposo). ¿Cuánta sangre bombea por día? Exprese la respuesta en m^3.
52. Como se indica en el problema precedente, su corazón bombea 92 cm^3 de sangre por segundo. Si su volumen total de sangre es de 5.2 litros, ¿cuál es el tiempo promedio de viaje para que su sangre complete un viaje completo por su sistema circulatorio?
53. Las computadoras usan comúnmente muchos millones de transistores; cada transistor ocupa un área de aproximadamente 10^{-6} m × 10^{-6} m = 10^{-12} m^2. ¿Cuántos de estos transistores pueden acomodarse en un chip de silicio de 1 cm^2? Las computadoras de generaciones futuras pueden explotar un acomodo tridimensional de los transistores. Si cada capa de transistores tiene un espesor de 10^{-7} m, ¿cuántos transistores podrían acomodarse en un cubo de silicio de 1 cm^3?
54. El agua tiene una densidad de 1.00 g/cm^3. Exprese esto en libras por galón.
55. Exprese los resultados de los siguientes cálculos en notación científica con un número apropiado de cifras significativas:
    a) $3.6 \times 10^{4} \times 2.049 \times 10^{-2}$.
    b) $2.581 \times 10^{2} - 7.264 \times 10^{1}$.
    c) $0.079832 \div 9.43$.
56. Nuestro Sol tiene un radio de 7.0×10^{8} m y una masa de 2.0×10^{30} kg. ¿Cuál es la densidad promedio? Exprese su respuesta en gramos por centímetro cúbico.
57. Los púlsares o estrellas de neutrones tienen comúnmente un radio de 20 km y una masa igual a la del Sol (2.0×10^{30} kg). ¿Cuál es la densidad promedio de un púlsar como éstos? Exprese su respuesta en toneladas métricas por centímetro cúbico.
58. El volumen total de los océanos de la Tierra es 1.3×10^{18} m^3. ¿Qué porcentaje de la masa de la Tierra está en los océanos?
59. Una manguera contra incendio surte 300 litros de agua por minuto. Exprese esto en m^3/s. ¿A cuántos kilogramos de agua por segundo equivale esto?
60. Los meteorólogos generalmente reportan la cantidad de lluvia en términos de la altura en pulgadas a la que se acumularía el agua en una superficie plana si no se dispersara. Suponga que 1 pulgada de lluvia cae durante una tormenta. Exprese esto en metros cúbicos de agua por metro cuadrado de superficie. ¿A cuántos kilogramos de agua por metro cuadrado de superficie equivale esto?
61. Los núcleos de todos los átomos tienen aproximadamente la misma densidad de masa. El núcleo de un átomo de cobre tiene una masa de 1.06×10^{-25} kg y un radio de 4.8×10^{-15} m. El núcleo de un átomo de plomo tiene una masa de 3.5×10^{-25} kg. ¿Cuál es su radio? El núcleo de un átomo de oxígeno tiene una masa de 2.7×10^{-26} kg. ¿Cuál es su radio? Suponga que los núcleos son esféricos.
62. La tabla impresa dentro de la tapa del libro da las masas y los radios de los principales planetas. Calcule la densidad promedio

† Estrictamente, es el eje semimayor de la órbita de la Tierra.

de cada planeta y haga una lista de los planetas en orden de densidades decrecientes. ¿Hay una correlación entre la densidad de un planeta y su distancia al Sol?

63. El techo de una casa tiene una pendiente o inclinación de 1:1 (es decir, 45°). El techo tiene una forma compleja, con varios gabletes y buhardillas (véase la figura 1.18), pero todas las superficies de techo tienen la misma pendiente. El área del piso de planta es de 250 m^2. ¿Cuál es el área de la superficie del techo?

FIGURA 1.18 Techo de una casa.

64. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que usan los navegadores de barcos y aviones utiliza señales de radio de satélites artificiales para determinar la posición de la nave. Las unidades portátiles que se usan en los yates (véase la figura 1.19) incluyen un receptor de radio y una computadora. Dan la posición con una precisión dentro de ± 15 m. ¿Qué error de ángulo de latitud corresponde a un error norte-sur de 15 m a lo largo de la superficie de la Tierra?

FIGURA 1.19 Receptor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

65. Algunos cristales pueden pulirse en un ángulo para producir "escalones atómicos" agudos (véase la figura 1.20). ¿Cuál ángulo θ debería escogerse para producir un escalón cada cinco átomos? ¿Y cuál para un escalón cada diez átomos? ¿Cuántos átomos habrá a lo largo de un escalón si un cristal es pulido en forma tan plana como se acostumbra normalmente en la práctica, de manera usual alrededor de 0.10°?

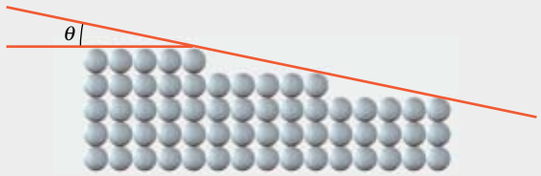


FIGURA 1.20 Escalones atómicos de un cristal.

66. Usted desea calcular la altura de un rascacielos desde el piso. Para hacerlo, camina 50 pasos (aproximadamente 75 m) alejándose de una pared vertical y, usando un transportador, mide un ángulo de 78°, que es la línea del campo de visión que el rascacielos hace con la horizontal hasta lo alto. ¿Cuánto mide el rascacielos? ¿Cuántas cifras significativas hay en su resultado?

67. En un año astronómico, o "año tropical", de 365.24 días, la Tierra se mueve una vez alrededor del Sol; es decir, se mueve 360° a lo largo de su órbita y regresa al mismo punto de la órbita. ¿Qué tan lejos alrededor del Sol, en grados, se mueve la Tierra en 4 años calendario consecutivos (uno de los cuales es un año bisiesto de 366 días)?

*68. En las Galápagos (sobre el Ecuador), la pequeña isla de Marchena está a 60 km al oeste de la pequeña isla de Genovesa. Si el Sol se oculta a las 8:00 p.m. en Genovesa, ¿cuándo lo hará en Marchena?

*69. Para los árboles altos, el diámetro en la base (o el diámetro en cualquier punto del tronco, como el punto medio) es proporcional en forma aproximada a la longitud elevada a $\frac{3}{2}$. La enorme secuoya en Sequoia National Park en California mide 81 m, un diámetro de 7.6 m en la base y una masa de 6 100 toneladas métricas. Una secuoya fosilizada que se halló en Nevada mide 90 m. Estime el diámetro en la base y también la masa que tenía cuando aún vivía.

PROBLEMAS DE REPASO

70. La Tierra es aproximadamente una esfera de 6.37×10^6 m de radio. Calcule la distancia del polo al Ecuador, medida a lo largo de la superficie de la Tierra. Calcule la distancia del polo al Ecuador, medida a lo largo de una línea recta que pase a través de la Tierra.

71. La "masa atómica" del uranio fisionable es de 235.0 g. ¿Cuál es la masa de un solo átomo de uranio? Exprese su respuesta en kilogramos y en unidades de masa atómica.

72. ¿Cuántas moléculas de agua hay en 1.0 litros de agua? ¿Cuántos átomos de oxígeno? ¿Cuántos átomos de hidrógeno?

73. ¿Cuántas moléculas hay en un centímetro cúbico de aire? Suponga que la densidad del aire es de 1.3 kg/m^3 y que consiste completamente en moléculas de nitrógeno (N_2). La masa atómica del nitrógeno es de 14.0 g.

74. La sangre humana normal contiene 5.1×10^6 glóbulos rojos por milímetro cúbico. El volumen total de la sangre en un hombre de 70 kg es de 5.2 litros. ¿Cuántos glóbulos rojos tiene este hombre?

75. Una pintura epóxica se usa para pintar el casco de un barco y se aplica a razón de un litro de pintura por 8 metros cuadrados de superficie del casco. ¿Cuál será el espesor de la película de pintura recién aplicada?

76. Las chimeneas en Estados Unidos arrojan alrededor de 8×10^6 toneladas métricas de cenizas por año. Si este material se sedimenta uniformemente sobre toda la superficie de ese país (9.4×10^6 km^2), ¿cuántos kilogramos de ceniza se depositarán por metro cuadrado cada año?

77. Durante muchos años, el límite federal de velocidad en carretera era de 55 mi/h. Exprese esto en kilómetros por hora, pies por segundo y metros por segundo.

78. El núcleo de un átomo de hierro es esférico y tiene un radio de 46×10^{-15} m. La masa del núcleo es 9.5×10^{-26} kg. ¿Cuál es la densidad del material nuclear? Exprese su respuesta en toneladas métricas por centímetro cúbico.

79. La duración de vida humana más larga oficialmente verificada es la del japonés Shigechiyo Izumi, quien murió en 1986 a la edad de 120 años y 237 días. Exprese esta edad en segundos. ¿Cuántas cifras significativas tiene su resultado?

80. Un camino de subida a una colina tiene una pendiente de 1:9. ¿A qué altura asciende en 300 metros de distancia horizontal? ¿Cuál es la distancia correspondiente medida a lo largo del camino?

81. Una avioneta de un solo motor está volando a una altura de 5 000 metros a una distancia (horizontal) de 18 km del aeropuerto de San Francisco cuando el motor se apaga. La aviadora sabe que, sin el motor, el avión planeará hacia abajo a un ángulo de 15°. ¿Puede llegar a San Francisco?

*82. Usted está cruzando el Atlántico en un velero y espera recalar en las Azores. El pico más alto de las Azores mide 2 300 m. ¿Desde qué distancia puede ver este pico saliendo apenas del horizonte? Suponga que sus ojos están (casi) al nivel del agua.

*83. Algunos ingenieros han propuesto que, para viajes de larga distancia entre ciudades, se debe excavar túneles de conexión perfectamente rectos a través de la tierra (véase la figura 1.21). Un tren que corra a lo largo de un túnel así aceleraría al inicio, en la primera mitad del túnel, como si fuera en bajada. Alcanzará la rapidez máxima en el punto medio del túnel, y gradualmente disminuirá su velocidad en la segunda mitad del túnel, como si fuera en subida. Suponga que un túnel así se excavara entre San Francisco y Washington, D.C. La distancia entre estas ciudades, medida sobre la superficie terrestre, es de 3 900 km.

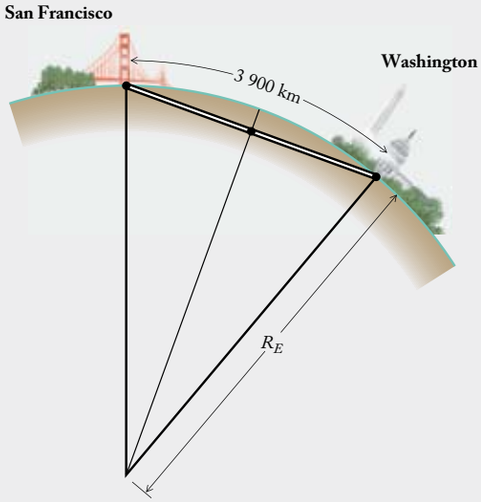


FIGURA 1.21 Un túnel propuesto a través de la tierra.

a) ¿Cuál es la distancia a lo largo del túnel recto?

b) ¿Cuál es la profundidad del túnel en su punto medio, en alguna parte debajo de Kansas?

c) ¿Cuál es la pendiente hacia abajo del túnel en relación con la dirección horizontal en San Francisco?

Respuestas a las revisiones

Revisión 1.1

1. Los cuerpos extensos tienen muchas características que pueden medirse; por ejemplo, puede especificarse el tamaño y la forma midiendo el diámetro de las bolas de boliche, el área superficial o el volumen, con unidades de longitud, longitud al cuadrado y longitud al cubo, respectivamente. Otras cantidades mensurables incluyen la densidad, la dureza, la temperatura, el color y la composición química; se examinarán las unidades de tales cantidades en capítulos posteriores.

2. Como el origen de la cuadrícula de coordenadas x'-y' está desplazada del origen del sistema x-y por una cantidad negativa en la dirección x, y por una cantidad positiva en la dirección y, cualquier punto tendrá valores mayores de x' comparados con x y menores valores de y' comparados con y, como en la figura 1.3*a*.

3. Una cuadrícula de coordenadas se usa para especificar posiciones en el espacio. Un marco de referencia incluye relojes que especifican el tiempo en el que algo ocurre en cierta posición.

Revisión 1.2

1. Hay 100 centímetros en un metro y hay 1 000 metros en un kilómetro, de modo que hay $100 \times 1\,000 = 10^5$ centímetros en un kilómetro. Del mismo modo, con 10 milímetros cúbicos en un metro, hay $10^3 \times 10^3 = 10^6$ milímetros en un kilómetro.

2. Como hay 10^6 micras en un metro y 10^{-15} metros en un fermi, hay $10^{-15} \times 10^6$ micras $= 10^{-9}$ en un fermi.
3. (C) 10^{-4}. Hay 10^6 micras en un metro y 10^{-10} metros en un angstrom. Por tanto, hay $10^{-10} \times 10^6$ micras $= 10^{-4}$ micras en un angstrom.

Revisión 1.3

1. Hay $60 \times 60 = 3\,600$ segundos en una hora y hay 1 000 milisegundos en un segundo. De modo que hay $1\,000 \times 3\,600 = 3.6 \times 10^6$ milisegundos en una hora. Hay 10^{12} picosegundos en un segundo y 10^6 microsegundos en un segundo, de modo que hay 10^6 picosegundos en un microsegundo.
2. (B) 6.0×10^{16}. Hay 10^{15} femtosegundos en un segundo y 60 segundos en un minuto, de modo que hay $60 \times 10^{15} = 6.0 \times 10^{16}$ femtosegundos en un minuto.

Revisión 1.4

1. De la tabla 1.8, hay 10^3 kg en una tonelada métrica. Como hay 10^3 gramos en un kilogramo, entonces hay $10^3 \times 10^3 = 10^6$ gramos en una tonelada métrica. Además, hay 10^9 miligramos en una tonelada métrica y por tanto 10^{-9} toneladas en un miligramo.
2. (D) 6.02×10^{26}. Hay 1.66×10^{-27} kilogramos en una u. De modo que el número de u por kilogramo es la inversa, 1 u/(1.66 $\times 10^{-27}$ kg) $= 6.02 \times 10^{26}$ u/kg.

Revisión 1.5

1. Como 1 m $= 10^2$ cm, entonces un metro cuadrado es $(1\text{ m})^2 = (10^2\text{ cm})^2 = 10^4\text{cm}^2$. De igual manera, un metro cúbico es $(1\text{ m})^3 = (10^2\text{ cm})^3 = 10^6\text{cm}^3$. Estos valores también pueden obtenerse directamente de las tablas 1.9 y 1.10.
2. Usando la tabla 1.9, $1\text{ km}^2 = 10^6\text{ m}^2 \times (1\text{ mm}^2)/10^{-6}\text{ m}^2 = 10^{12}\text{ mm}^2$.
3. (D) 10^{18}. De la tabla 1.10, $1\text{ km}^3 = 10^9\text{ m}^3 \times (1\text{ mm}^3)/10^{-9}\text{ m}^3) = 10^{18}\text{ mm}^3$.

Revisión 1.6

1. Como la longitud y la anchura son alrededor de 20 a 30 cm, una medición de cualquiera de estas dimensiones al milímetro más próximo (1 mm = 0.1 cm) dará tres cifras significativas. El espesor es de sólo unos pocos centímetros, de modo que su medición al 0.1 cm más próximo tendrá dos cifras significativas. El volumen es el producto de estas tres longitudes y tendrá sólo tantas cifras significativas como el menor número de cifras significativas en las cantidades multiplicadas; el volumen, por tanto, tiene dos cifras significativas.
2. Sólo se lee el número de dígitos. El primer número tiene dos cifras significativas y los otros tienen tres.
3. El producto tiene sólo tantas cifras significativas como el menor número de cifras significativas en las cantidades multiplicadas. Aquí, el producto tiene dos cifras significativas.
4. Cuando se suma, sólo el mayor lugar decimal entre las últimas cifras significativas de las cantidades sumadas es significativo en el resultado. Aquí, se tiene que redondear al último 10, ya que sólo se conocía el dígito de 10 s en el segundo número que se dio. Así, se escribe: 1.9×10^2 para la suma.
5. Para los factores de conversión, sólo se escribe la relación para cantidades iguales, que proporciona las unidades deseadas. Para las conversiones dadas, los factores son, respectivamente: $1\text{ km}/10^3\text{ m}$; $10^3\text{ m}/1\text{ km}$; $1\text{ km}/10^5\text{ cm}$; $1\text{ km}^2/(10^3\text{ m})^2$; $1\text{ km}^3/(10^3\text{ m})^3$; $(1\text{ km}/10^3\text{ m}) \times (3\,600\text{ s}/1\text{ h})$; $(1\text{ mi}/1\,609\text{ m}) \times (3\,600\text{ s}/1\text{ h})$.
6. (A) $(1\text{ km}/10^3\text{ m}) \times (3\,600\text{ s}/1\text{ h})$. Cuando se multiplica por m/s, esto proporciona al mismo tiempo las unidades deseadas de km/h y contiene los factores correctos de conversión.